10月 October
2020, 63(10): 1194-1200
昆 虫 学 报
ACTA ENTOMOLOGICA SINICA
http://www.insect.org.cn
doi: 10.16380/j.kcxb.2020.10.004

绿僵菌 MaFZ-13 对橙带蓝尺蛾幼虫致病力及林间防治效果

郑 宏

(龙岩市新罗区森林病虫害防治检疫站, 福建龙岩 364000)

摘要:【目的】橙带蓝尺蛾 *Milionia basalis* 近年来在我国南方地区严重危害罗汉松 *Podocarpus macrophyllus* 和竹柏 *Podocarpus nagi*,扩散蔓延速度快,造成了很大的损失。本研究旨在评估金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* MaFZ-13 菌株对橙带蓝尺蛾幼虫的致病力,探寻橙带蓝尺蛾生物防治新资源。【方法】通过绿僵菌 MaFZ-13 不同浓度($1.0\times10^5\sim1.0\times10^9$ 孢子/mL)孢子悬浮液接种橙带蓝尺蛾幼虫,运用时间-剂量-死亡率(TDM)模型对生物测定结果进行分析,同时通过林间喷施 1.0×10^8 孢子/mL 绿僵菌孢子悬浮液进行林间防治效果试验。【结果】橙带蓝尺蛾幼虫累计死亡率随着绿僵菌 MaFZ-13 孢子悬浮液孢子浓度的增加和接种时间的延长而增大。接种 1.0×10^9 孢子/mL 孢子悬浮液 8 d 后以及接种 1.0×10^8 孢子/mL 孢子悬浮液 10 d 后,幼虫死亡率均达到 100%;接种 1.0×10^7 孢子/mL 孢子悬浮液 15 d 后幼虫死亡率为 95.6%。应用 TDM 模型对生测数据进行分析,结果表明所建模型通过 Hosmer-Lemeshow 拟合异质性检验,并由模型估算出了该菌株对橙带蓝尺蛾幼虫的致死剂量和致死时间。绿僵菌 MaFZ-13 菌株接种 4, 5, 6 和 7 d 后的半致死剂量(LC_{50})对数估计值分别为 7.99, 7.12, 6.46 和 5.83。以 1.0×10^7, 1.0×10^8 和 1.0×10^9 孢子/mL 的孢子浓度接种时,绿僵菌 MaFZ-13 菌株对橙带蓝尺蛾幼虫的 LT_{50} 值分别为 5.19, 3.99 和 2.81 d。林间用 1.0×10^8 孢子/mL 绿僵菌孢子悬浮液喷洒 9 d 后橙带蓝尺蛾幼虫死亡率可达到 85.8%,防治效果为 85.05%。【结论】绿僵菌 MaFZ-13 对橙带蓝尺蛾幼虫具有较强的致病力,林间防治效果良好,具有较好的应用潜力。

关键词: 金龟子绿僵菌; 橙带蓝尺蛾; 生物测定; 时间-剂量-死亡率(TDM)模型; 林间防治

中图分类号: S476.12; S763.38 **文献标识码**: A **文章编号**: 0454-6296(2020)10-1194-07

Pathogenicity and field efficacy of *Metarhizium anisopliae* strain MaFZ-13 against *Milionia basalis* (Lepidoptera: Geometridae) larvae

ZHENG Hong (Forestry Diseases and Pests Control Station of Xinluo District of Longyan City, Longyan, Fujian 364000, China)

Abstract:【Aim】*Milionia basalis* is an insect pest causing serious damage to buddhist pine (*Podocarpus macrophyllus*) and broadleaf podocarpus (*Podocarpus nagi*) in southern China in recent years, and spreads rapidly, causing huge loss. This study aims to search new biocontrol agent for this pest by evaluating the pathogenicity of *Metarhizium anisopliae* strain MaFZ-13 against *M. basalis* larvae.【Methods】*M. basalis* larvae were inoculated with different concentrations ($1.0\times10^5-1.0\times10^9$ conidia/mL) of spore suspension of *M. anisopliae* strain MaFZ-13, and then the bioassay data were analyzed using time-dose-mortality (TDM) model. In the meantime, the field control efficacy against this pest was also tested by spraying the spore suspension of *M. anisopliae* strain MaFZ-13 at the concentration

基金项目: 福建省林业科研项目(闽林科[2017]3号); 国家林业和草原局南方山地用材林培育重点实验室资助项目
作者简介: 郑宏, 男, 1968年3月生, 福建新罗人, 农学学士, 高级工程师, 研究方向为森林病虫害防治, E-mail: xlqsfjyz@163.com
收稿日期 Received: 2020-02-14; 接受日期 Accepted: 2020-04-03

of 1.0×10^8 conidia/mL. 【Results】The cumulative mortality of *M. basalis* larvae increased with the spore concentration of *M. anisopliae* strain MaFZ-13 spore suspension and inoculation time. The cumulative mortality of *M. basalis* larvae reached 100% at 8 d after inoculation with the spore suspension at the concentration of 1.0×10^9 conidia/mL and 10 d after inoculation with the spore suspension at the concentration of 1.0×10^8 conidia/mL, respectively. When inoculated with the spore suspension at the concentration of 1.0×10^7 conidia/mL, 95.6% larvae died at 15 d after inoculation. The data analysis using TDM model revealed that the constructed model fitted the data well as shown by Hosmer-Lemeshow goodness of fit test, and the values of lethal dose and lethal time of this fungal strain against *M. basalis* larvae were estimated with the model. The logarithm values of the estimated LC_{50} values of *M. anisopliae* strain MaFZ-13 against *M. basalis* larvae were 7.99, 7.12, 6.46 and 5.83, respectively, at 4, 5, 6 and 7 d after inoculation. When inoculated with *M. anisopliae* suspension at the concentrations of 1.0×10^7, 1.0×10^8 and 1.0×10^9 spores/mL, the median lethal time (LT_{50}) values of *M. anisopliae* strain MaFZ-13 against *M. basalis* larvae were 5.19, 3.99 and 2.81 d, respectively. The spore suspension of *M. anisopliae* strain MaFZ-13 at the concentration of 1.0×10^8 conidia/mL caused 85.8% mortality of *M. basalis* larvae in the field at 9 d after spraying, with the control efficacy of 85.05%. 【Conclusion】*M. anisopliae* strain MaFZ-13 has high pathogenicity and field efficacy against *M. basalis* larvae, with high potential application value.

Key words: *Metarhizium anisopliae*; *Milionia basalis*; bioassay; time-dose-mortality (TDM) model; field control

罗汉松 *Podocarpus macrophyllus* 和竹柏 *Podocarpus nagi* 四季常青、树形优美，国内分布于秦岭至长江下游以南至海南和台湾（吴征镒，2004），尤其在福建、广东、广西、海南、台湾等省区广泛种植，是重要的园林绿化、庭院观赏树种，除了具有较高的美学观赏价值外，还具有较高的医学药用价值（夏聪等，2015；黄相玲等，2018）。

橙带蓝尺蛾 *Milionia basalis* 又名黄带枝尺蛾、罗汉松尺蛾、橙带丹尺蛾，属鳞翅目（Lepidoptera）尺蛾科（Geometridae），目前发现其幼虫只取食罗汉松和竹柏这两种罗汉松科植物；其成虫色彩艳丽，在白天活动，有人误认为是蝴蝶（图 1）。据报道，该虫曾在日本严重危害罗汉松（Kamata，2002）；国内最早在 2012 年广西博白林场发现严重危害竹柏（王缉健等，2014），其后在海南、广东和台湾等地陆续有罗汉松上成灾的报道（余海滨等，2015；林伟等，2017），肖斌等（2019）报道 2017 年在江西省大余县也发现该虫。严重发生时，每株虫口密度高的达数百头，食量惊人，可将植物的叶片取食殆尽。由于该虫一年多代，世代重叠，部分植株因遭受连续危害而无法萌发新叶导致死亡。橙带蓝尺蛾近年在福建省也有零星发生，起初并未引起重视。2018 年以来该虫危害区域和危害程度迅速扩大，特别是在闽南（泉州、厦门、漳州）以及闽西龙岩新罗区发生严重，





图 1　橙带蓝尺蛾成虫及其幼虫在竹柏上的危害状

Fig. 1　Damage symptoms of *Milionia basalis* adults and larvae on *Podocarpus nagi*

A：停息在罗汉松树干上的成虫 Adult resting on the trunk of *P. macrophyllus*；B：幼虫群集取食竹柏 Larvae feeding in group on *P. nagi*.

德化县美湖镇桂格村一株 360 余年、树围达 6 m 的"状元树"竹柏，叶片被取食后只剩光秃的枝干；2019 年在福州、三明、南平等地也有数十株至数百株连片林木叶片被吃光的现象，同年 8 月在福州市晋安区寿山乡林阳寺内一株千年罗汉松，数天内叶片被取食 60% 以上。

目前，关于该虫的防治技术研究很少，在发现虫口密度较高时大多以喷洒触杀性化学农药进行防治，虽可快速抑制虫口，但是其负面效应也明显，尤其是罗汉松、竹柏基本上是园林绿化树种，种植区域多是人员活动比较频繁的地方，虫害的发生和防治更易受到关切，显然不宜过多使用化学农药。因此，探寻该虫高效、环保的生物防治资源十分迫切。绿僵菌 *Metarhizium* spp. 是应用最为广泛的虫生真菌之一，因其具有致病力强、对人类和脊柱动物安全、对环境友好和易大量培养等优点，在国内外农林害虫的防治中发挥了重要作用（蒲蛰龙和李增智，1996；周燚等，2006；Zimmermann，2007；何学友等，2011；潘春燕等，2016；杨华等，2018；Bogdányi *et al*.，2019），甚至作为生物杀虫剂在巴西等国应用于防治牛身上的蜱螨——微小扇头蜱 *Rhipicephalus microplus*（Beys-da-Silva*et al*.，2020）。福建省林业科学研究院的研究人员通过比较不同来源金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 菌株对橙带蓝尺蛾幼虫的致病力，筛选出了一株优良绿僵菌菌株 MaFZ-13（何学友等，2020）。本研究在此基础上，利用时间-剂量-死亡率模型（TDM）分析了绿僵菌 MaFZ-13 对橙带蓝尺蛾幼虫的时间效应和剂量效应的互作，并进行了初步林间防治试验，为今后开展绿僵菌防治提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试菌株和试虫

1.1.1 菌株：供试菌株为金龟子绿僵菌 *M. anisopliae* MaFZ-13（以下简称绿僵菌 MaFZ-13），该菌株由福建省林业科学研究院森林保护研究所研究人员分离、保存。

1.1.2 试虫来源及饲养：供试橙带蓝尺蛾为 3 龄幼虫，采集于福建省尤溪县罗汉松苗圃。幼虫采集后置于大养虫笼中，带回实验室以新鲜罗汉松枝叶饲养 1 d 后，挑选健康幼虫分装入昆虫饲养盒中，每饲养盒放置 15 头作为室内生物测定试验的 1 个重复。

1.2 生物测定

1.2.1 孢子悬浮液配制：试验前，将供试绿僵菌菌株斜面上孢子转接到 PDA 平板（直径 9 cm）培养基上，置于 25 ± 1℃ 的恒温培养箱中培养 15 d，待平板培养基上长满墨绿色孢子后，即可收集孢子用于试验接种。参考何学友等（2011）方法，收集平板培养基表面的孢子后用 0.03% 吐温-80 水溶液配制孢子悬浮液，依次配制成 1.0×10^9，1.0×10^8，1.0×10^7，1.0×10^6 和 1.0×10^5 孢子/mL 5 个浓度的孢子悬浮液。

1.2.2 人工接种和致病力测定：将上述 1.1.2 节试虫进行接种试验。每个浓度孢子悬浮液处理 6 个重复，即每个浓度处理 90 头幼虫；对照组用 0.03% 吐温-80 水溶液处理，4 个重复，共 60 头幼虫。使用微量喷雾器将孢子悬浮液均匀喷在试虫的体表，每重复喷菌液 2 mL，处理完后，将试虫置于吸水纸上置放 20 s，以避免虫体上太多液体易导致死亡。处理后将幼虫重新置于干净的养虫盒，以新鲜的罗汉松枝叶饲养，每 2 d 更换一次。每天记录不同处理的幼虫存活情况。死亡后的幼虫保湿处理，以便观察是否为绿僵菌感染。接种测定在 2019 年 5 月下旬至 6 月上旬进行，室内环境温度为 18 ~31℃。

1.3 林间防治试验

1.3.1 菌液配制：林间防治用绿僵菌孢子使用液固双相发酵法生产（由福建省林业科学研究院森保所研究人员制作并提供），制成的粗粉剂为 5.0×10^9 孢子/g，干燥后密封置于 4℃ 冰箱保存。防治时用 0.03% 吐温-80 水溶液将菌粉配制成浓度为 1.0×10^8 孢子/mL 孢子悬浮液，配制后用双层纱布过滤，使用背负式电动喷雾器进行林间喷雾。菌液现配现用。

1.3.2 林间施菌：试验地在龙岩市新罗区红坊镇船巷村竹柏苗圃，位于山脚东坡，竹柏高 2 ~5 m，虫口密度 40 ~156 头/株。2019 年 7 月 13 日 16:00 时以后喷菌 1 次，菌液在苗圃的植株上全面喷施，以喷湿全部叶片（微微滴水）为准。喷施后，选取叶片受害率在 30% ~50% 之间，间距在 8 ~10 m 的 5 株竹柏作为调查样株，每样株上选取树冠中部合适的 3 根枝条进行套笼，套笼为长 100 cm，直径 60 cm 的尼龙纱笼，每笼中有 15 ~20 头幼虫，施菌后每天观察橙带蓝尺蛾幼虫的活力及取食情况，在 3，6 和 9 d 调查幼虫死亡率。对照为距离施菌圃地 30 ~40 m 远没有施菌的竹柏，喷洒 0.03% 吐温-80 的清水，设置 4 个套笼 60 头幼虫。

1.4 数据分析

时间-剂量-死亡率（time-dose-mortality，TDM）模型分析试验数据在 DPS 数据处理软件（v7.05 版

本）进行分析处理，使用软件自带的模型对生测数据进行模拟，得到绿僵菌对橙带蓝尺蛾幼虫致病力的 TDM 模型参数估计，进而分析时间效应和剂量效应（冯明光，1998；唐启义和冯明光，2002）。

林间防治试验防治效果计算方法见下式：

$$防治效果(\%) = \frac{处理组死亡率 - 对照组死亡率}{100 - 对照组死亡率} \times 100。$$

2　结果

2.1　接种孢子悬浮液后幼虫累计死亡率变化

橙带蓝尺蛾幼虫接种绿僵菌 MaFZ-13 不同浓度孢子悬浮液后，累计死亡率情况见图 2。累计死亡率随时间增大，孢悬液浓度越大，幼虫的死亡速度越快。接种 1.0×10^9 孢子/mL 孢子悬浮液 6 d 后，幼虫死亡率超过 80%；8 d 时达到 100%；接种 1.0×10^8 孢子/mL 孢子悬浮液 7 d 时，幼虫死亡率超过 80%，10 d 时死亡率达到 100%。接种 1.0×10^7 孢子/mL 孢子悬浮液时，幼虫死亡速度略慢一些，死亡高峰出现在 3－8 d，接种 9 d 后，死亡达到 80%；接种 15 d 后，幼虫死亡率为 95.6%。接种 1.0×10^6 和 1.0×10^5 孢子/mL 两个浓度的孢子悬浮液时，幼虫死亡速度相对较慢，接种后 15 d，累计死亡率分别为 82.7% 和 71.1%。处理组虫尸经保湿培养后，大部分表现出绿僵菌感染的情况，体表先长出白色菌丝，随后产生大量墨绿色孢子（图 3）。

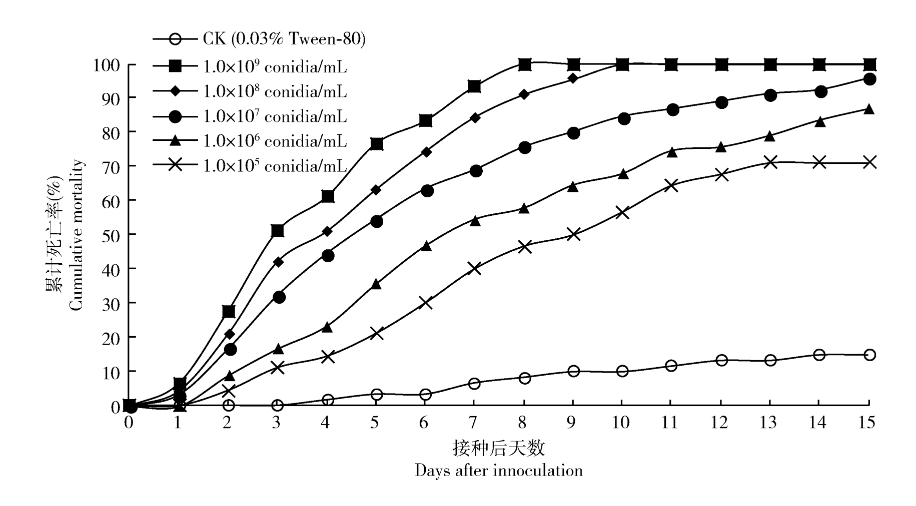


图 2　橙带蓝尺蛾幼虫接种不同浓度绿僵菌 MaFZ-13 菌株孢子悬浮液后的累计死亡率

Fig. 2　Cumulative mortality of *Milionia basalis* larvae inoculated with different concentrations of spore suspension of *Metarhizium anisopliae* strain MaFZ-13

图 3　橙带蓝尺蛾幼虫被绿僵菌感染状

Fig. 3　Symptoms of *Milionia basalis* larvae infected by *Metarhizium anisopliae*

2.2　时间-剂量-死亡率模型分析

绿僵菌对橙带蓝尺蛾幼虫的时间-剂量-死亡率（TDM）模型分析和参数估计结果见表 1。所建模型卡方统计量为 5.75（$df = 8$，$P = 0.68$），小于 $\chi^2_{0.05} = 15.51$。结果表明利用生测数据建立的模型通过了 Hosem-Lemeshow 拟合度测试，拟合的模型异质性不显著，说明模型是有效、可信的。

各处理浓度与时间效应参数的 t 测验值均达到极显著水平（$P < 0.01$），说明绿僵菌 MaFZ-13 菌株剂量效应与时间效应极显著。该菌株对橙带蓝尺蛾幼虫的剂量效应参数 β 为 0.4483，时间效应参数在橙带蓝尺蛾幼虫接种后第 7 天（γ_7）达到最大，表明该时间段幼虫死亡数较多。

2.3　绿僵菌 MaFZ-13 对幼虫的剂量和时间效应

绿僵菌 MaFZ-13 菌株对橙带蓝尺蛾幼虫死亡率的 TDM 模型估计的剂量效应见图 4，随着接种时间的延长，LC_{50} 和 LC_{90} 值逐渐下降，绿僵菌接种橙带蓝尺蛾幼虫后 4，5，6 和 7 d 的半致死剂量（LC_{50}）对数值分别为 7.99，7.12，6.46 和 5.83。接种后 3 d 以内幼虫死亡率较小，所以 LC_{50} 和 LC_{90} 估计值偏大。

表 1 绿僵菌 MaFZ-13 菌株对橙带蓝尺蛾幼虫的时间-剂量-死亡率(TDM)模型模拟与参数估计
Table 1 Parameters estimated from modeling of the time-dose-mortality (TDM) by bioassay of *Metarhizium anisopliae* strain MaFZ-13 against *Milionia basalis* larvae

条件死亡率模型 Conditional mortality model					累计死亡率模型 Cumulative mortality model			
参数 Parameter	估计值 Estimated value	标准误 *SE*	*t* 检验 *t*-test	$P_{值}$ *P*-value	参数 Parameter	估计值 Estimated value	方差 Var (τj)	协方差 Cov (β, τj)
β	0.4483	0.0399	11.2274	0.0001	β	0.4483	0.001	0.001
γ_1^*	-6.853	0.4267	16.0603	0.0001	τ_1^*	-6.8530	0.1128	-0.0079
γ_2	-5.2425	0.3349	15.6527	0.0001	τ_2	-5.0604	0.0684	-0.0077
γ_3	-4.8713	0.3284	14.8355	0.0001	τ_3	-4.2683	0.063	-0.0076
γ_4	-5.2464	0.3409	15.3911	0.0001	τ_4	-3.9491	0.0612	-0.0075
γ_5	-4.6994	0.3255	14.4358	0.0001	τ_5	-3.5623	0.0591	-0.0074
γ_6	-4.6196	0.3235	14.2780	0.0001	τ_6	-3.2641	0.0572	-0.0073
γ_7	-4.3833	0.3230	13.5721	0.0001	τ_7	-2.9815	0.0555	-0.0072
γ_8	-4.3879	0.3322	13.2106	0.0001	τ_8	-2.7624	0.0537	-0.0071
γ_9	-4.5590	0.3519	12.9545	0.0001	τ_9	-2.6089	0.0521	-0.0070
γ_{10}	-4.3185	0.3480	12.4076	0.0001	τ_{10}	-2.4426	0.0502	-0.0068
γ_{11}	-4.2128	0.3497	12.0460	0.0001	τ_{11}	-2.2853	0.0482	-0.0067
γ_{12}	-4.9781	0.4744	10.4933	0.0001	τ_{12}	-2.2198	0.0475	-0.0066
γ_{13}	-4.5625	0.4255	10.7225	0.0001	τ_{13}	-2.1281	0.0467	-0.0066
γ_{14}	-4.8936	0.5257	9.3081	0.0001	τ_{14}	-2.0671	0.0464	-0.0065
γ_{15}	-4.5510	0.4929	9.2324	0.0001	τ_{15}	-1.9869	0.0461	-0.0065

* 下标数字表示接种后相应时间(天) The subscript number represents the corresponding day after inoculation.

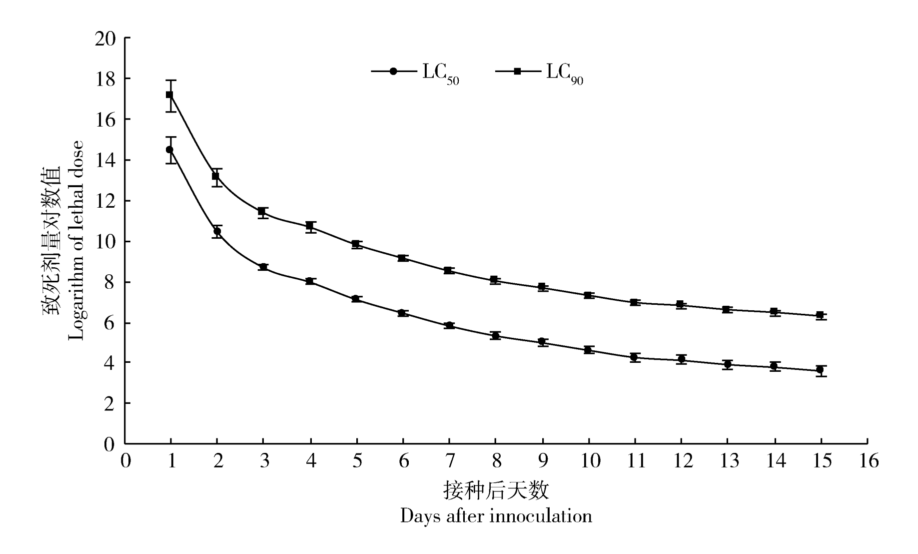


图 4 绿僵菌 MaFZ-13 菌株接种橙带蓝尺蛾幼虫后各时段 LC_{50} 和 LC_{90} 的对数值
Fig. 4 Logarithms of the time-dependent LC_{50} and LC_{90} values for *Metarhizium anisopliae* strain MaFZ-13 against *Milionia basalis* larvae

绿僵菌 MaFZ-13 对橙带蓝尺蛾致病力的时间效应见表 2。致死时间(LT_{50} 和 LT_{90})随着孢悬液浓度的增加而递减(表 2),1.0×10^7, 1.0×10^8 和 1.0×10^9 孢子/mL 孢子悬浮液引起的 LT_{50} 值分别为 5.19, 3.99 和 2.81 d,对应的 LT_{90} 值分别为 10.89, 8.07 和 6.26 d。1.0×10^5 和 1.0×10^6 孢子/mL 两个浓度孢子悬浮液接种后幼虫死亡率未达到 90%,无法估计出 LT_{90} 的值。

2.4 绿僵菌 MaFZ-13 对橙带蓝尺蛾的林间防治效果

用 1.0×10^8 孢子/mL 孢子悬浮液在林间喷雾防治结果见图 5。根据林间套笼观察,幼虫死亡率随时间增高;喷菌后 3 d,虽幼虫死亡率不高,但大部分幼虫活力下降,取食量减少,危害性降低;喷菌后

6 d 死亡率为 65.4%，防治效果为 64.03%；喷菌后 9 d 幼虫死亡率可达到 85.8%，防治效果为 85.05%。

表 2　不同浓度绿僵菌 MaFZ-13 菌株孢子悬浮液对橙带蓝尺蛾幼虫的 LT_{50} 和 LT_{90} 值

Table 2　The LT_{50} and LT_{90} values for different concentrations of spore suspension of *Metarhizium anisopliae* strain MaFZ-13 against *Milionia basalis* larvae

孢子浓度（孢子/mL）Spore concentration (conidia/mL)	LT_{50} (d)	LT_{90} (d)
1.0×10^5	9.00	–
1.0×10^6	6.73	–
1.0×10^7	5.19	10.89
1.0×10^8	3.99	8.07
1.0×10^9	2.81	6.26

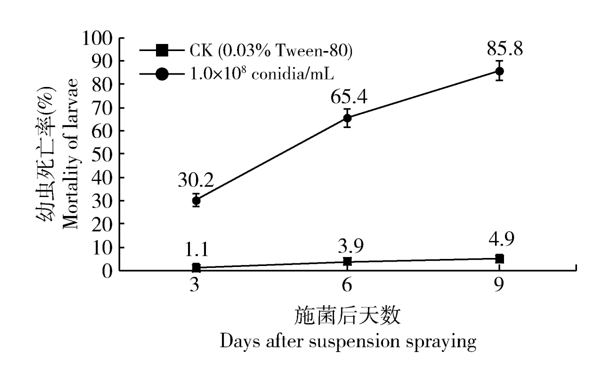


图 5　1.0×10^8 孢子/mL 绿僵菌 MaFZ-13 菌株孢子悬浮液对橙带蓝尺蛾幼虫的林间防治效果

Fig. 5　Control efficacy of spore suspension of *Metarhizium anisopliae* strain MaFZ-13 at the concentration of 1.0×10^8 conidia/mL against *Milionia basalis* larvae in the field

3　讨论

橙带蓝尺蛾是近年来危害罗汉松和竹柏的一种新害虫，其危害呈现明显的暴发性特点，在局部区域造成了严重的损失（王缉健等，2014；余海滨等，2015；林伟等，2017；肖斌等，2019）。目前关于该虫的发生规律尚没有系统的研究报道。由于幼虫在取食过程中可将寄主植物含有的罗汉松内酯 A 糖苷（inumakilactone A glucoside）、竹柏内酯（nagilactone）等有毒成份转移入体内，使鸟类避食（Yasui，2001），据林农反映，捉其幼虫饲喂家禽，罕见取食；其成虫、幼虫颜色和斑纹醒目，具有明显的警戒色；该虫的天敌少见，我们在调查与饲养中发现幼虫被球孢白僵菌 *Beauveria bassiana*、蛹期有棒束孢（拟青霉）寄生外，其他天敌较少。这些也可能是造成暴发成灾的原因之一。因此，筛选对致病力强的优良绿僵菌菌株，为防治该虫提供高效的生物防治资源十分必要。

研究结果显示接种绿僵菌 MaFZ-13 后，橙带蓝尺蛾幼虫的累计死亡率随时间增大，孢悬液浓度越大，幼虫的死亡速度越快（图 2）。时间-剂量-死亡率（TDM）模型分析结果表明绿僵菌对其致死过程中的剂量效应和时间效应存在显著的互作关系（表 1），当孢子浓度为 1.0×10^8 孢子/mL 时，致死中时（LT_{50}）值为 3.99 d（表 2），可见绿僵菌 MaFZ-13 是一株对其幼虫具有较强致病力的菌株，具有较好的应用潜力。林间防治试验结果（图 5）显示，1.0×10^8 孢子/mL 孢子悬浮液喷菌 9 d 后防治效果可达 85%，研究结果为利用该菌株进行防治提供了依据。从节约成本考虑，林间防治推荐使用 1.0×10^7 ~ 1.0×10^8 孢子/mL 是较理想的施菌浓度。同时，要加强该虫发生的预测预报工作，目前生产上防治明显滞后，如果能在其低龄幼虫期防治，易取得较好的效果，达到事半功倍的目的。另外，由于该虫在地面枯枝落叶或浅层土壤中化蛹，可以考虑在地面喷撒粉剂，操作更为简便。罗汉松、竹柏等大多是园林绿化树种，野外环境复杂多样，合适的施用剂型和最佳的施菌时间需要进一步研究。

任何杀虫剂生物活性的剂量效应和时间效应之间是互作的，TDM 模型可以将时间和剂量（浓度）效应统一到一个模型（Nowierski *et al*., 1996；王联德等，2003；Qiu *et al*., 2013；王定峰等，2013），避免了机率分析中时间效应和剂量（浓度）效应相互排斥的问题，能充分利用生物测定的数据信息，在评价真菌杀虫剂的致病性方面具有较好的应用价值，应用该模型来分析评价菌株的生防潜力更加全面可靠。

致谢　研究工作中，福建省林业科学研究院何学友教授级高级工程师、蔡守平高级工程师、宋海天博士等给予大力支持，在此表示衷心感谢！

参考文献（References）

Beys-da-Silva WO，Rosa RL，Berger M，Coutinho-Rodrigues CJB，Vainstein MH，Schrank A，Bittencourt VREP，Santi L，2020. Updating the application of *Metarhizium anisopliae* to control cattle tick *Rhipicephalus microplus*（Acari：Ixodidae）. *Exp. Parasitol*., 208：107812.

Bogdányi FT，Petrikovszki R，Balog A，Putnoky-Csicsó B，Gódor A，Bálint J，Tóth F，2019. Current knowledge of the entomopathogenic fungal species *Metarhizium flavoviride* sensu lato and its potential in sustainable pest control. *Insects*，10（11）：385.

Feng MG, 1998. Time-dose-mortality model instead of probability analysis technique. *Entomol. Knowl.*, 35(4): 233－237. [冯明光, 1998. 时间-剂量-死亡率模型取代机率分析技术. 昆虫知识, 35(4): 233－237]

He XY, Cai SP, Tong YH, Xiong Y, Huang Y, Xie JD, Chen SL, 2011. Pathogenicity evaluation of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* against adults of *Basilepta melanopus* (Coleoptera: Eumolpidae). *Acta Entomol. Sin.*, 54(11): 1281－1287. [何学友, 蔡守平, 童应华, 熊瑜, 黄勇, 谢家冬, 陈顺立, 2011. 球孢白僵菌和金龟子绿僵菌不同菌株对黑足角胸叶甲成虫的致病力评价. 昆虫学报, 54(11): 1281－1287]

He XY, Cai SP, Zheng H, Zeng LQ, Chen WY, Lin XB, Zhan ZR, 2020. Comparison of virulence of 5 strains *Metarhizium anisopliae* against *Milionia basalis* larvae. *Fujian For. Sci. Technol.*, 47(2): 15－19. [何学友, 蔡守平, 郑宏, 曾丽琼, 陈文玉, 林曦碧, 詹祖仁, 2020. 5 株绿僵菌对橙带蓝尺蛾幼虫致病力比较. 福建林业科技, 47(2): 15－19]

Huang XL, Zhang MY, Zhu LQ, Deng DL, Zhao LJ, 2018. Comparison of morphological traits and physiological and biochemical characteristics of leaves of four species in *Podocarpus*. *Acta Agric. Jiangxi*, 30(8): 12－15. [黄相玲, 张明月, 朱栗琼, 邓冬丽, 招礼军, 2018. 4 种罗汉松叶片形态性状及生理生化特性比较. 江西农业学报, 30(8): 12－15]

Kamata N, 2002. Outbreaks of forest defoliating insects in Japan, 1950－2000. *Bull. Entomol. Res.*, 92: 109－117.

Lin W, Xu L, Guo Q, Yu DJ, Lu XY, Zhang WF, Wang LC, Weng HM, Jiang L, 2017. A pest on *Podocarpus macrophyllus* – *Milionia basalis* Walker. *Plant Quarant.*, 31(4): 67－69. [林伟, 徐浪, 郭强, 余道坚, 卢小雨, 张伟锋, 王林聪, 翁洪明, 蒋露, 2017. 一种罗汉松害虫——橙带蓝尺蛾. 植物检疫, 31(4): 67－69]

Nowierski RM, Zeng Z, Jaronski S, Delgado F, Swearingen W, 1996. Analysis and modeling of time-dose-mortality of *Melanoplus sanguinipes*, *Locusta migratoria migratorioides*, and *Schistocerca gregaria* (Orthoptera: Acrididae) from *Beauveria*, *Metarhizium*, and *Paecilomyces* isolates from Madagascar. *J. Invertebr. Pathol.*, 67(3): 236－252.

Pan CY, Cai YJ, Li TC, Zhang WQ, 2016. Control effect of *Metarhizium anisopliae* and its mixture with dsRNA on the brown planthopper. *J. Environ. Entomol.*, 38(6): 1071－1077. [潘春艳, 蔡尤俊, 李腾超, 张文庆, 2016. 绿僵菌及其与 dsRNA 混合使用对褐虱的防治效果. 环境昆虫学报, 38(6): 1071－1077]

Pu ZL, Li ZZ, 1996. Insect Mycology. Anhui Science and Technology Publishing House, Hefei. 362－441. [蒲蛰龙, 李增智, 1996. 昆虫真菌学. 合肥: 安徽科学技术出版社. 362－441]

Qiu JZ, Song FF, Mao LH, Tu J, Guan X, 2013. Time-dose-mortality data and modeling for the entomopathogenic fungus *Aschersonia placenta* against the whitefly *Bemisia tabaci*. *Can. J. Microbiol.*, 59(2): 97－101.

Tang QY, Feng MG, 2002. DPS Data Processing System for Practical Statistics. Science Press, Beijing. 188－201. [唐启义, 冯明光, 2002. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统. 北京: 科学出版社. 188－201]

Wang DF, Liu FJ, Li HL, Zhang H, Wu GY, 2013. Time-dose-mortality model analysis of *Beauveria bassiana* XJBb3005 against *Myllocerinus aurolineatus*. *Fujian J. Agric. Sci.*, 28(8): 807－811. [王定锋, 刘丰静, 李慧玲, 张辉, 吴光远, 2013. 球孢白僵菌 XJBb3005 对茶丽纹象甲致病力的时间-剂量-死亡率模型分析. 福建农业学报, 28(8): 807－811]

Wang JJ, Yang XH, Liang C, Zou JC, Lin HQ, 2014. *Milionia zonea pryeri*, an important leaf-eating pest of *Podocarpus nagi*. *Guangxi Plant Prot.*, 27(2): 22－23, 45. [王缉健, 杨秀好, 梁晨, 邹金成, 林汉权, 2014. 竹柏重要食叶害虫——橙带丹尺蛾. 广西植保, 27(2): 22－23, 45]

Wang LD, Huang J, Lin GY, Liang ZS, 2003. The time-dose-mortality model of two *Verticillium lecanii* isolates on sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci*. *J. Fujian Agric. For. Univ.*, 32(2): 167－171. [王联德, 黄建, 林谷园, 梁智生, 2003. 蜡蚧轮枝菌对烟粉虱的时间-剂量-死亡率模型研究. 福建农林大学学报, 32(2): 167－171]

Wu ZY, 2004. Flora of China, Vol. 1. Science Press, Beijing. 110－112. [吴征镒, 2004. 中国植物志(第 1 卷). 北京: 科学出版社. 110－112]

Xia C, Qi YQ, He SQ, Gong ZQ, Ye GR, 2015. Application and existing problems of *Podocarpus macrophyllus* in landscaping. *Mod. Hortic.*, (6): 125. [夏聪, 齐跃强, 何世庆, 龚志勤, 叶广荣, 2015. 罗汉松在园林绿化中的应用及存在问题. 现代园艺, (6): 125]

Xiao B, Xiao L, Xiao XY, 2019. Risk analysis of *Milionia basalis pryeri* in Dayu County. *Biol. Dis. Sci.*, 42(1): 62－65. [肖斌, 肖力, 肖香英, 2019. 橙带蓝尺蛾在大余的风险性分析报告. 生物灾害科学, 42(1): 62－65]

Yang H, Xu JZ, Zhao DY, Qiu HL, Jie YZ, Lian T, Qin CS, 2018. Evaluation of the potential of *Metarhizium* microcapsules for controlling *Ceracris kiangsu* Tsai. *Chin. J. Biol. Control*, 34(4): 553－558. [杨华, 徐金柱, 赵丹阳, 邱华龙, 揭育泽, 练涛, 秦长生, 2018. 绿僵菌微胶囊剂防治黄脊竹蝗的潜力评价. 中国生物防治学报, 34(4): 553－558]

Yasui H, 2001. Sequestration of host plant-derived compounds by geometrid moth, *Milionia basalis*, toxic to a predatory stink bug, *Eocanthecona furcellata*. *J. Chem. Ecol.*, 27(7): 1345－1353.

Yu HB, Qin CS, Zhao DY, 2015. Risk analysis of *Milionia basalis pryeri* in China. *Guangdong For. Sci. Technol.*, 31(5): 84－87. [余海滨, 秦长生, 赵丹阳, 2015. 橙带蓝尺蛾在中国的风险性分析. 广东林业科技, 31(5): 84－87]

Zhou Y, Wang ZK, Yu ZN, 2006. Development and Application of Microbial Pesticides. Chemical Industry Press, Beijing. 54－88. [周燚, 王中康, 喻子牛, 2006. 微生物农药研发与应用. 北京: 化学工业出版社. 54－88]

Zimmermann G, 2007. Review on safety of the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*. *Biocontrol Sci. Technol.*, 17(9): 879－920.

(责任编辑: 赵利辉)